基于风险分析方法的首车疏解车头时距

刘明君[1,2],孙全欣[2],高利平[3],陈振起[4],毛保华[2]

(1.国家发展和改革委员会 综合运输研究所,北京 100038;2.北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室,北京 100044;3.北京军区66019部队29分队,北京 100144;4.扬州市规划局 城市规划编制研究中心,江苏 扬州 225002)

摘　要:构建了信号交叉口首车疏解车头时距的风险分析模型。提出了模型参数标定方法,并以北京为例,通过信号交叉口的实测数据标定了参数。根据参数标定结果,对混合交通流情况下首车疏解车头时距的分布进行了描述,并定量分析了各种影响因素的效果。结果表明,北京信号交叉口首车疏解车头时距长于其他国家和地区。它受车辆类型、交叉口环境的复杂程度和车流特性等因素影响明显。起动干扰使首车平均疏解车头时距由3.99 s增长到5.47 s,行驶干扰使之由4.15 s延长到6.65 s,极大地降低了交通运行效率。

关键词:交通运输工程;首车疏解车头时距;风险分析;混合交通流;信号交叉口

中图分类号:U491　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5497(2011)05-1262-06

Modeling first discharge headway based on hazard analysis

LIU Ming-jun[1,2], SUN Quan-xin[2], GAO Li-ping[3], CHEN Zhen-qi[4], MAO Bao-hua[2]

(1. *Institute of Comprehensive Transportation, National Development and Reform Commission, Beijing* 100038, *China*; 2. *MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing* 100044, *China*; 3. *Unit* 29, *Army* 66019, *PLA Beijing Military Area, Beijing* 100144, *China*; 4. *Yangzhou Urban Planning Bureau, Urban Planning Research Center, Yangzhou* 225002, *China*)

Abstract: A hazard analysis model was built for the first discharge headway of queuing vehicles at the signalized intersections. The calibration method was proposed for the model parameters and the calibration was performed using the traffic data collected from the signalized intersections in Beijing. The distribution of the first discharge headways in the heterogeneous traffic flow was described and the effects of different factors were analyzed quantitatively. The results show the first discharge headway at the signalized intersections in Beijing is much longer than those in other countries and regions. It is obviously affected by the vehicle type, the complexity of the environment at the intersection and the traffic flow behavior. The starting disturbance increases the average first discharge headway from 3.99 s to 5.47 s, the moving disturbance prolongs it from 4.15 s to 6.65 s, both factors reduce the traffic operation efficiency significantly.

Key words: engineering of communications and transportation; first discharge headway; hazard analysis; heterogeneous traffic flow; signalized intersection

---

收稿日期:2009-12-07.

基金项目:"973"国家重点基础研究发展规划项目(2006CB705507);国家自然科学基金项目(70631001, 70571005);北京市科委项目(D07020601400702).

作者简介:刘明君(1982-),男,助理研究员,博士.研究方向:交通运输规划与管理.E-mail:alexlius@yahoo.cn

通信作者:毛保华(1963-),男,教授,博士生导师.研究方向:交通运输规划与管理.E-mail:bhmao@china.com

0 引　言

信号交叉口排队车辆疏解车头时距(Discharge headway)是微观交通分析中的一个关键参数，直接反映了司机驾驶行为特性、交叉口通行能力和服务水平[1-2]。Greenshields[3]研究了信号交叉口排队车辆平均疏解车头时距与排队位置的关系，Moussavi[4]探讨了车型和车道构成对疏解车头时距的影响，Tong[5]对香港信号交叉口疏解车头时距进行了比较分析，并构建了神经网络模型进行仿真研究，González[6]则以墨西哥Monterrey市为例进行了分析，这些研究结果表明疏解车头时距受车辆类型、排队位置、车流方向、车辆间相互影响等因素影响十分明显。由于上述研究均是基于纯机动车流环境的分析，而发展中国家混合交通流环境与发达国家之间纯机动车交通流交通特性差异明显，且目前鲜有关于混合交通流环境下信号交叉口排队车辆疏解车头时距研究，为此，本文以北京的若干个典型信号交叉口为研究对象，构建了基于风险分析的首车疏解车头时距模型并标定了相关参数，探讨了混合交通流环境下信号交叉口排队车辆首车疏解车头时距的分布情况，并对各因素的具体效果进行了定量分析，以期深化对混合交通特性的认识，为深入研究饱和流率、交叉口通行能力等问题提供支持。

1 数据采集与变量遴选

1.1 数据采集

数据采集是首车疏解车头时距分析的关键步骤，本研究中所有交叉口车辆疏解车头时距数据均源于北京。为使数据能充分反映北京交通的实际情况，选择典型信号交叉口时遵循调查点位置、交叉口类型和车道功能多元分布原则；同时，为了避免内部干扰，调查时尽量选择远离公交站台和不含路边停车位的交叉口。5 个信号交叉口的基本特性如表 1 所示。

为保证视频效果，调查中将高清摄像机架设于观测进口附近高层建筑或过街天桥进行拍摄，以便对进口引道内排队机动车辆、交叉口内行人与非机动车的行为特性以及信号灯变化情况详细记录。

数据后期处理过程中，利用 Windows Movie Maker 进行视频播放，根据研究需要由经过培训的专门人员提取数据，所有数据均精确到毫秒。

表 1　交叉口基本情况

Table 1　Intersections sites for data collecting

编号	类型	观测入口	相位数	进口车道数
1	十字	东进口	5	5
2	十字	东进口	4	4
3	十字	东进口	4	3
4	丁字	北进口	3	3
5	十字	东进口	2	2

1.2 变量遴选

车辆疏解车头时距主要依赖于交叉口物理特性(相位数目、车道属性与区位)、车辆特性(车辆类型)以及交通流特性(起动干扰、行驶干扰)，除此之外，在车辆行驶过程中，车辆会受到各种外在因素的影响而导致行驶状态发生改变，影响车辆疏解车头时距[7]。受实际条件的限制，有些因素如驾驶员性格等数据采集难度过大，故暂不考虑。在国内外相关研究的基础上并结合北京混合交通流特点，本研究选择 6 个影响因素，如表 2 所示，其中变量 X_1、X_3 和 X_4 均为多分类变量。

表 2　关键变量与定义

Table 2　Definition of variables

变量	定义	备　注
X_1	车辆类型	0 表示小客车和出租车；1 表示中型客车和货车；2 表示公交和大型货车
X_2	相位类型	0 表示 2 相位交叉口，1 表示多相位交叉口
X_3	车道类型	0 表示专左车道，1 表示外侧直行车道，2 表示内侧直行车道，3 表示专右车道
X_4	交叉口区位	0 表示住宅区，1 表示商务区，2 表示政务区
X_5	起动干扰	0 表示不存在起动干扰，反之为 1
X_6	行驶干扰	0 表示不存在行驶干扰，反之为 1

在表 2 中，车辆类型是一个三分类变量，根据车辆大小分为小型车、中型车和大型车[8]；车道类型主要根据车道功能及车道相对位置分为专左车道、外侧直行车道、内侧直行车道和专右车道；交叉口位置变量主要用于反映交通区位以及交叉口复杂程度对疏解车头时距的影响；机动车辆在绿灯启亮初期很容易受到行人和自行车的干扰，因此通过二分类变量 X_5 和 X_6 描述。

2 模型的构建

2.1 模型结构

风险分析方法(Hazard-based analysis)是对持续时间进行分析的统计技术的总称，其所表达的状态的“持续”与“终结”的概念也逐渐应用于行

人过街风险分析[9]、出行行为分析[10]等方面,但目前尚无研究人员应用该方法刻画车辆疏解车头时距。

本研究中将持续时间定义为信号绿灯启亮到队列中首车后保险杠通过进口停车线的这一段时间,即首车疏解车头时距。假设首车疏解车头时距 T 的累计分布函数为

$$F(t)=p(T<t) \tag{1}$$

该函数表示持续时间 T 小于 t 的概率。

T 的概率密度函数为

$$f(t)=\mathrm{d}F/\mathrm{d}t \tag{2}$$

假设 S 表示 T 的生存函数,该函数表示 T 超过或者等于 t 的概率,则有

$$S(t)=1-F(t)=p(T\geqslant t) \tag{3}$$

假设 $h(t)$ 表示 T 的风险函数,即 T 已经持续到 t 的情况下,在时间 Δt 内通过进口停车线的条件概率,用公式表示为

$$h(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{p(t\leqslant T<t+\Delta t|T\geqslant t)}{\Delta t}=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{S(t)-S(t+\Delta t)}{\Delta t\cdot S(t)} \tag{4}$$

整理得

$$h(t)=-\frac{S'(t)}{S(t)} \tag{5}$$

在此条件下生存函数 $S(t)$ 可以表示为

$$S(t)=e^{-\int_0^t h(t)\mathrm{d}t} \tag{6}$$

首车疏解车头时距模型的研究旨在建立疏解车头时距与影响因子之间类似于广义线性模型的关联。由于 Cox 比例风险模型较为成熟稳定,同时不需要对任何变量进行特殊的分布假设[11],因此本文采用 Cox 比例风险模型描述首车疏解车头时距。Cox 模型主要包括两部分,即基准风险函数和指数函数,其表达式如下:

$$h(t|X,\beta)=h_0(t)e^{\beta\cdot X} \tag{7}$$

式中:$h_0(t)$ 为基准风险函数,X 为影响因子,β 是对应影响因子的系数。

为了分析两个向量因子 X_1、X_2 的相对风险性,将式(7)变形并推导,构建风险率函数:

$$HR=h(t|X_1,\tilde{\beta})/h(t|X_2,\tilde{\beta})=e^{(X_1-X_2)\cdot\tilde{\beta}} \tag{8}$$

根据 Cox 相对风险性假设[10],$h_0(t)$ 在式(8)计算中相互抵消,同时 $\tilde{\beta}$ 是 β 的估计值,则 HR 为常数。当 HR 大于1时,表示在 X_2 影响下,信号交叉口排队车辆首车期望疏解车头时距将长于在 X_1 影响下的时距,即在 X_1 环境下首车疏解车头时距更短。

在分析中,定义下面3种情况为数据删失(Censored):①当调头信号和左转信号相同时,排在专左车道队首的调头车辆;②不受信号控制的专右车道排队车辆;③在信号绿灯转换之前已部分或全部通过入口停车线的车辆。

2.2 参数估计

假设研究容量为 n 的样本,包括3个变量 T_j、δ_j、$X_j(t)$,$(j=1,2,\cdots,n)$;其中 T_j 表示对第 j 个体的研究时间;δ_j 是事件标识变量,如果事件发生,$\delta_j=1$,如果事件为右删失,则 $\delta_j=0$;$X_j(t)=(X_{j1}(t),\cdots,X_{jp}(t))'$ 表示第 j 个体在时刻 t 时的协变量向量或影响因素,并假设协变量不随时间改变,即 $X_j(t)=X_j=(X_{j1},\cdots,X_{jp})'$。

假设分类变量 Y 有 $n+1$ 个类别,为保证设计的矩阵满秩,转化为 n 个哑变量 $y_1,y_2,\cdots,y_n$,必须将其中任意一个哑变量的系数赋值为零,才能保证似然函数估计的唯一性。为便于描述,假设将第 $n+1$ 类别作为参照水平,系数 $\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n$ 分别表示 $1,2,\cdots,n$ 水平相对于 $n+1$ 水平的对数风险比。例如,水平1相对于水平2的对数风险比为

$$(1\times\theta_1+0\times\theta_2+\cdots+0\times\theta_n)-(0\times\theta_1+1\times\theta_2+\cdots+0\times\theta_n)=\theta_1-\theta_2 \tag{9}$$

定义时间 t_i 时的风险集为 $R(t_i)$,它表示在 t_i 之前仍未通过进口停车线的所有首车集合,则风险函数为

$$h(t)=h_0(t)\exp\left[X_i\beta_i+\sum_{l=1}^{n+1}\left(\sum_{s=1}^{n}y_{ls}\theta_s\right)^{\delta}\right] \tag{10}$$

构造含有分类变量的比例风险模型的偏似然函数如下:

$$L(\beta,\theta)=\prod_{i=1}^{k}\frac{\exp\left[X_i\beta_i+\sum_{l=1}^{n+1}\left(\sum_{s=1}^{n}y_{ls}\theta_s\right)\right]^{\delta}}{\sum_{r\in R_i}\exp\left[X_r\beta_i+\sum_{l=1}^{n+1}\left(\sum_{s=1}^{n}y_{ls}\theta_s\right)\right]^{\delta}} \tag{11}$$

式(11)两边取对数,得对数偏似然函数:

$$LL(\beta,\theta)=\sum_{i=1}^{k}\left[\beta_iX_i+\sum_{l=1}^{n+1}\left(\sum_{s=1}^{n}y_{ls}\theta_s\right)^{\delta}\right]-\sum_{i=1}^{k}\ln\sum_{j\in R(t_i)}\exp\left[\beta_iX_i+\sum_{l=1}^{n+1}\left(\sum_{s=1}^{n}y_{ls}\theta_s\right)^{\delta}\right] \tag{12}$$

在求得对数偏似然函数的基础上，分别对 β 和 θ 求偏导，利用多元函数求极值的方法，即可求得似然方程组系数 $\beta_1,\beta_2,\cdots,\beta_n$ 和 $\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n$ 的极大似然估计值 $\tilde{\beta}_1,\tilde{\beta}_2,\cdots,\tilde{\beta}_n$ 和 $\tilde{\theta}_1,\tilde{\theta}_2,\cdots,\tilde{\theta}_n$。

3　案例分析

3.1　参数估计结果

根据视频调查数据，随机提取 694 个排队首车数据作为分析样本，同时选取表 2 所示的影响首车疏解车头时距的 6 个主要因素，其中 x_1、x_2、x_4 为多分类变量，其他均为 2 分类变量。根据第 2 节参数估计方法对变量进行参数估计，得到参数估计结果如表 3 所示。

表 3　参数估计结果与显著水平

Table 3　Parameters estimation and significant level

影响因素	系数 β	T 检验	exp(β)
$X_1(1)$	−0.256	−1.96 *	0.77
$X_1(2)$	−0.853	−4.87 * *	0.43
X_2	−0.707	−4.10 * *	0.49
$X_3(1)$	0.043	1.97 *	1.04
$X_3(2)$	0.267	2.01 *	1.31
$X_3(3)$	−0.469	−2.04 *	0.63
$X_4(1)$	0.258	2.01 *	1.29
$X_4(2)$	−0.252	−2.22 *	0.78
X_5	−0.296	−2.70 * *	0.74
X_6	−0.696	−4.25 * *	0.50
LL(0)=5150.047　LL(β)=5030.462　Degree of freedom=10			

注："*"和"**"分别表示模型所选取的影响因素在 95% 和 99% 的置信水平下对 T 具有显著影响。

根据表 3 中 T 检验结果，可以发现模型所选择的 6 个变量对首车疏解车头时距均有明显影响。同时，假设在 $H_0:\beta_1=\beta_2=\cdots=\beta_k=0$ 下，服从自由度为 10 的 χ^2 分布，显著水平为 95%，由于 $-2[\ln L(0)-\ln L(\beta)]=5150.047-5031.082=118.965>\chi^2_{0.05}$，因此拒绝原假设，认为模型所选择的变量(影响因素)对 T 有显著影响。

3.2　首车疏解车头时距分布的描述

通过该模型对样本数据的估计，可以得到北京首车平均疏解车头时距的估计值为 4.54 s，该值明显高于香港的 3.6 s[5]、墨西哥的 3.3 s[6]、利雅得的 3.2 s[4]。原因主要在于 2 个方面[12]：一是由于中国城市交通中行人、非机动车与机动车混行现象严重，行人与非机动车的干扰导致首车疏解车头时距增大；二是由于车辆性能相对较差，延长了车辆起动与反应时间，进而增大了首车疏解车头时距。

从模型的参数估计结果可以得到 T 的连续累积概率分布，图 1 所示为根据 T 的风险分析模型得到的绿灯开始后，T 的连续分布曲线。各时间点的累积生存率反映了 T 的长短，表示从绿灯开始到经过时间 t 后，信号交叉口排队车辆首车还没有通过进口停车线的概率。由图中可以看出，在绿灯开始瞬间，所有车辆均未完全通过停车线，累积生存率为 1；经过 1 s 后，累积生存率降到 96.4%，说明仅有 3.6% 的排队车辆的 T 少于 1 s；2 s 后，10.1% 的排队首车通过了进口停车线；4 s 时，累积生存率降到 54.1%，即有 45.9% 的排队车辆的 T 短于 4 s；15% 的生存率对应的 T 为 6.04 s，这意味着在中国交通环境下，有 15% 的交叉口排队车辆的 T 超过了 6.04 s。

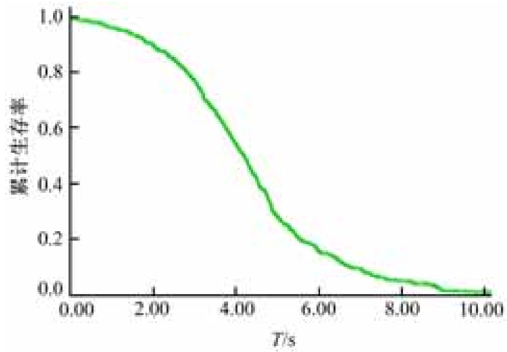

图 1　首车疏解车头时距分布曲线

Fig. 1　Distribution of the first discharge headway

3.3　影响因素定量分析

根据模型参数估计结果，车辆类型 $X_1(1)$ 和 $X_1(2)$、信号相位数量 X_2、车道功能 $X_3(3)$、交叉口位置 $X_4(2)$、起动干扰 X_5、行驶干扰 X_6 等影响变量的偏回归系数均小于 0，即 $\exp(\beta_k x_k)$ 小于 1，表明这些因素使首车在绿灯后某一时刻通过停车线的概率从基准风险率 $h_0(t)$ 降至 $\exp(\beta_k x_k)\times h_0(t)$，且其系数越小，在某一时间通过停车线的概率也越小，疏解车头时距越长。而车道功能 $X_3(1)$ 和 $X_3(2)$、交叉口位置 $X_4(1)$ 这 3 个影响变量的偏回归系数大于 0，即 $\exp(\beta_k x_k)$ 大于 1，表明该影响因素使首车在某一时间内进入交叉口的概率从基准风险率 $h_0(t)$ 增至 $\exp(\beta_k x_k)\times h_0(t)$ 倍，且系数越大，在某一时间内通过停车线的概率也越大，即疏解车头时距越短。

根据上述的回归参数,可以定量地描述各个显著变量对首车疏解车头时距的影响,现分析如下:

(1)交叉口物理特征

交叉口物理特征主要通过相位数目、车道属性和区位 3 个指标衡量。

一般而言,交叉口相位数量间接地反映了交叉口交通组织的复杂程度,相位越多,该交叉口交通情况也就越复杂。该参数标定结果为−0.707,其相对风险度为 exp(−0.707)=0.49,说明当不考虑其他因素时,多相位交叉口车辆首车疏解车头时距要大于两相位交叉口;而对其首车平均疏解车头时距的计算结果也印证了这一结论,多相位交叉口首车平均疏解车头时距为 4.71 s,两相位交叉口为 2.98 s,前者远大于后者。

车道属性变量是一个多分类变量,分为专左车道、内侧直行车道、外侧直行车道和专右车道。内侧直行车道变量系数估计值为 0.267,外侧直行车道估计值为 0.043,右转车道估计值为−0.469,相对专左车道风险度分别为 1.31、1.04 和 0.63,说明在其他条件相同时,内侧直行车道首车疏解车头时距小于外侧直行车道,这与香港[5]、墨西哥[6]等城市情形基本相同。直行车道首车疏解车头时距均短于专左车道,主要是因为专左车道上的车辆存在一个转弯半径,交叉口车辆转弯时速度较低,因而车辆后轴通过停车线的时间长于直行车辆。专右车道首车车头时距长于专左车道,虽然都存在转弯半径,但由于右侧车道靠近路边,相对位于道路中央的专左车辆而言,右转车辆更容易受到行人和非机动车等的干扰。

交叉口所处区位对首车疏解车头时距的影响分析方法与相位数量、车道属性的分析类似,此处不再深入分析。

(2)车辆特性

本研究中车辆特性主要通过车辆类型反映。车辆类型变量同属多分类变量,包括小型车、中型车和大型车三类,参数估计过程中以小型车作为参照对象。在不考虑其他因素时,小型车首车平均疏解车头时距为 4.41 s,中型车为 4.78 s,大型车为 4.68 s。在模型中,中型车系数估计值为−0.256,大型车为−0.853,说明车型越大,在相同时间内通过停车线的概率越小,疏解车头时距越长。具体相对于参考车辆(即小型车)而言,在不考虑其他因素的情况下,在相同时间内,中型车通过停车线的概率为小型车的 exp{−0.256}=0.77;而大型车相对于小型车的风险度为 exp{−0.853}=0.43,即在相同时间内,大型车通过停车线的概率是小型车的 43%,说明随着车型的增大,首车疏解车头时距亦增大。

(3)交通流特性

在中国机动车和非机动车混行严重的交通环境下,车辆在起动或行驶过程中很容易受到外界干扰,因此本研究通过起动干扰和行驶干扰描述交通流特性。参数估计结果表明,未受起动干扰的车辆首车平均疏解车头时距为 3.99 s,而受起动干扰车辆为 5.47 s;其他情况相同的条件下,未受行驶干扰的车辆平均首车疏解车头时距为 4.15 s,而受行驶干扰的车辆为 6.65 s。

模型估计结果显示:车辆起动干扰变量系数估计值为−0.296,行驶干扰变量系数估计值为−0.696,则其相对风险度分别为 exp(−0.296)=0.74 和 exp(−0.696)=0.50。说明存在起动干扰的车辆在相同时间通过停车线的概率为无起动干扰车辆的 74%;而在仅考虑行驶干扰对首车疏解车头时距的影响时,存在行驶干扰的车辆在相同时间内通过停车线的概率为无行驶干扰车辆的 50%。图 2 所示为以是否受到起动干扰作为控制变量而得到的首车疏解车头时距分布曲线,从图 2 中可以看出,受干扰车辆分布曲线始终位于未受干扰车辆上方,说明受干扰的车辆首车疏解车头时距要大于未受干扰车辆。

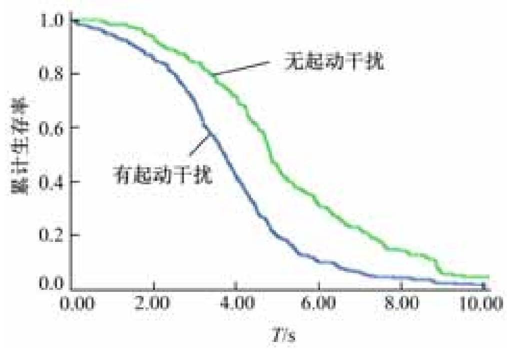

图 2 起动干扰对首车疏解车头时距的影响

Fig. 2 Distribution of the first discharge headway by starting disturbance

4 结 论

(1)通过模型对样本数据的估计,得到北京排队首车平均疏解车头时距为 4.54 s,比国外同类城市长 1～1.5 s,这是由北京特殊的高密度混合

交通流环境及车辆性能所决定的。

(2)根据模型参数估计的结果，首车疏解车头时距与车辆类型、交叉口相位复杂程度成正比例关系，车型越大，交叉口越复杂，车辆疏解车头时距越大。

(3)转向车道首车疏解车头时距大于直行车道。具体而言，专右车道首车疏解车头时距最大，专左车道次之，外侧直行车道首车疏解车头时距大于内侧直行车道。

(4)通过分析起动干扰和行驶干扰，发现起动干扰导致排队车辆首车平均疏解车头时距由 3.99 s 延长到 5.47 s；而行驶干扰导致排队车辆首车平均疏解车头时距由 4.15 s 延长到 6.65 s，说明干扰是影响首车疏解车头时距的重要因素。

参考文献：

[1] Gao L P, Liu M J, Sun Z Z, et al. Simulation on impact of information guidance on regional traffic flow [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(4): 63-69.

[2] Chen Z Q, Mao B H, Liu M J, et al. Modeling vehicles movement at signalized intersections[C]// Proceedings of the Sixth International Conference on Traffic and Transportation Studies, ASCE, USA, 2008.

[3] Greenshields B D, Schapiro D, Ericksen E L. Traffic performance at urban intersections[J]. Eno Foundation for Highway Traffic Control, 1947, 4 (2): 23-30.

[4] Moussavi M, Tarawneh M. Variability of departure headways at signalized intersections[C]// Institute of Transportation Engineers, 60th Annual Meeting, Orlando, Florida, 1990.

[5] Tong H Y, Hung W T. Neural network modeling of vehicle discharge headway at signalized intersection: model descriptions and results[J]. Transportation Research Part A, 2002, 36(1): 17-40.

[6] González L F C. Discharge headway at signalized intersections in Monterrey, Nuevo Leon, Mexico[D]. USA: Doctoral Dissertation of University of Texas, 2006.

[7] Guo J Y, Mao B H, Liu M J, et al. Study on actuated signal controlled system in isolated intersection [C]// 2008 Chinese Control and Decision Conference, Yantai, Shandong, 2008.

[8] Liu M J, Mao B H, Huang Y, et al. Comparison of pre- & post-Olympic traffic: A case study of several roads in Beijing[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(6): 67-72.

[9] 郭宏伟，高自友，赵小梅. 基于持续模型的行人过街行为[J]. 吉林大学学报：工学版，2009，39(增刊2)：35-40.
Guo Hong-wei, Gao Zi-you, Zhao Xiao-mei. Pedestrian crossing behaviours based on duration model [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(Sup.2): 35-40.

[10] 陈团生. 通勤者出行行为特征与分析方法研究[D]. 北京：北京交通大学交通运输学院，2007.
Chen Tuan-sheng. Travel behavior characteristics analysis for commuter[D]. Beijing: School of Traffic & Transportation, Beijing Jiaotong University, 2007.

[11] Cox D R. Regression models and life tables[J]. J Roy Statist Soc Ser B, 1972, 34: 187-220.

[12] 刘明君. 基于混合交通流的信号交叉口机动车车头时距研究[D]. 北京：北京交通大学交通运输学院，2010.
Liu Ming-jun. Modeling on discharge headway with heterogeneous traffic at signalized intersections[D]. Beijing: School of Traffic & Transportation, Beijing Jiaotong University, 2010.