

高速公路强制换道持续时间半参数生存分析

吴江玲¹, 张生瑞¹, Amit Kumar Singh², 秦 思¹, 孙振东¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. Atkins North America, Inc., Austin, TX, USA 78758)

摘 要: 为了分析高速公路施工作业区车辆的换道行为, 运用生存分析的半参数方法, 建立基于风险的车辆强制换道持续时间模型, 通过无人机采集包茂高速公路陕西境内某路段施工作业区的交通数据, 对道路车辆强制换道持续时间进行估计。结果表明: 强制换道持续过程的生存时间大于 5 s 的概率约为 80%, 大于 10 s 的概率为 28%, 一半以上处在 5~10 s 之间; 当距离小于 400 m 时, 换道起点至合流点距离越近, 车辆强制换道持续时间越短; 当距离大于 400 m 时, 车辆换道持续时间开始降低。车辆换道时间持续到 t 时刻, 在至合流点距离 50~100 m 范围内开始换道的车辆, 在下一时刻完成换道的可能性最大。

关键词: 强制换道; 换道持续时间; 施工区; 生存分析

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2017)11-2215-07

Semi-parametric survival analysis of mandatory lane changing duration on freeways

WU Jiang-ling¹, ZHANG Sheng-rui¹, SINGH Amit Kumar², QIN Si¹, SUN Zhen-dong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Atkins North America, Inc., Austin, TX, 78758, USA)

Abstract: A hazard-based mandatory lane changing (MLC) duration model was established using the semi-parametric method of survival analysis in order to analyze vehicle's lane changing behavior characteristics on freeway work zones. Field data in work zone at Bao-mao Freeway located in Shaanxi Province were collected through an unmanned aerial vehicle. The MLC durations were estimated by analyzing the field data. Results show that the probability of MLC process survival time more than 5 s is about 80%, and the probability of survival time more than 10 s is 28%. More than half of motor vehicles' lane changing(LC) process survival time are between 5~10 s. In terms of the distance from LC initial point to the merge point, in the range of 400 m, the less it is, the shorter the MLC duration will be. As the distance increases great than 400 m, the motor vehicles' MLC duration decreases. When the MLC processes last to t , the possibility of the motor vehicles, whose LC initial points locate in 50 to 100 m away from the merging point, complete LC is the greatest in the next moment.

Key words: mandatory lane changing; lane changing duration; work zone; survival analysis

收稿日期: 2016-12-28.

网址: www.zjujournals.com/eng/fileup/HTML/201710016.htm

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(310821172202); 中国博士后科学基金资助项目(2015M582593); 云南省交通运输厅科技计划资助项目(2014(A)29).

作者简介: 吴江玲(1987—), 女, 博士生, 从事交通安全、智能交通等研究. ORCID: 0000-0001-8736-0903. E-mail: wujiangling2006@gmail.com

通信联系人: 张生瑞, 男, 教授. ORCID: 0000-0002-9401-4686. E-mail: zhangsr@chd.edu.cn

车辆换道行为对交通流及交通安全有重要影响. 车辆变更车道是最常见的驾驶行为之一, 也是最容易引发交通事故或交通拥堵的行为之一, 研究人员开展了广泛的车辆换道模型研究, 研究成果应用于车辆自适应巡航控制 (adaptive cruise control, ACC) 和计算机仿真 (computer simulation, CS)^[1]. 一般的换道类型有 3 类, 强制换道 (mandatory lane changing, MLC)、择机决策换道 (discretionary lane changing, DLC) 和随机换道 (random lane changing, RLC). Li 等^[2]认为现有对称两车道元胞自动机 (symmetric two-lane cellular automata, STCA) 模型没有考虑车辆换道时间的不均匀性, 提出了换道时间的离散性分段值, 并假设换道过程中, 换道车辆同时占据 2 条相关车道来近似模拟连续的换道过程, 结果表明考虑换道时间的元胞自动机模型的通行效率有所降低. Singh 等^[3]也有类似的结论; Li 等^[4]在此基础上提出换道的时空持续过程与当前车辆速度有关, 明确给出了换道时间函数, 并得出低速车辆的换道概率呈现二维分布的结论. 但上述模型的理论假设并未有实测数据的支持. 李玉洁等^[5]探讨了不同交通密度下施工作业区换道点的问题; 李慧轩^[6]对车辆换道行为微观数据进行提取分析, 建立了换道持续时间与多因素的关系模型.

生存分析 (survival analysis) 是在综合考虑相关因素 (内因和外因) 的基础上, 对相关领域中与事件发生时间有关的问题提供统计规律的分析与推断方法^[7], 目前已广泛应用于相关领域. 在交通运输研究领域, 生存分析方法已经逐渐应用于交通事故分析^[8-10]、行人或非机动车过街分析^[11-12]、实时停车预测^[13]、机动车寿命分析^[14]及机动车燃油消耗量建模^[15-16]、交通拥堵持续时间分析^[17-18]、交通事件持续时间分析^[19-22]、出行时间^[23]、居民出行行为分析^[24]及其他与持续时间相关的交通现象^[25]等方面, 目前生存分析方法被用来研究驾驶行为^[26-27]. 生存分析方法在研究交通事件持续时间及其影响因素方面具有一定的优势, 该方法考虑每个观测出现某一结局的时间长短, 可考虑删失数据 (censored data), 且无需假定数据及误差服从某一分布. 鉴此, 本文利用半参数生存分析方法, 建立相应的数学模型, 对高速公路施工作业区车辆车型和换道起点至合流点距离对换道持续时间规律影响进行探讨, 期望为交通管理与控制和未来智能网联车自主换道研究提供一定的理论基础.

1 模型和方法

1.1 基于风险的车辆换道持续时间

令 X 代表目标车辆换道持续时间, 为非负随机变量. 它的累计分布函数为

$$F(t) = P(X \leq t) = \int_0^t f(x) dx, \quad \forall t \geq 0. \quad (1)$$

式中: $P(\cdot)$ 表示事件 $\{\cdot\}$ 发生的概率, $f(x)$ 为生存时间 X 的概率密度函数, t 为任意给定时间. 生存时间 X 的概率密度函数可表示为

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq X \leq t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad \forall t \geq 0. \quad (2)$$

式中: Δt 为时间 t 的瞬时增量.

目标车辆换道持续时间 X 的生存函数表示生存时间 (即换道持续时间) 大于 t 的概率, 具体的表达式为

$$S(t) = P(X > t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(x) dx, \quad \forall t \geq 0. \quad (3)$$

换道从车辆发生横向位移开始, 在换道时间 X 已经持续到 t 的情况下, 它在时间 Δt 内完成换道过程行驶至目标车道中心线的瞬时可能性用 $h(t)$ 表示, 即为换道持续时间 X 的风险函数, 用公式表示为

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < X < t + \Delta t | X \geq t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{S(t) - S(t + \Delta t)}{\Delta t S(t)}, \quad \forall t \geq 0. \quad (4)$$

1.2 换道持续时间 Cox 比例风险模型

为分析某类影响因素对换道持续时间的影响, 采用 Cox 比例风险模型分析换道持续时间数据.

1.2.1 Cox 比例风险模型建立 Cox 比例风险模型是一种乘法风险率半参数模型, 不需要生存数据服从某种分布的信息, 估计的性质不依赖于选取的生存时间分布, 但却可以通过一个模型来分析生存时间的分布规律以及协变量对生存时间的影响.

换道持续时间 $X > 0$, 以及与 X 相关的影响因素变量 (协变量) 构成的向量为 $Z = [Z_1, \dots, Z_q]$, 则考虑协变量的风险函数

$$h(t/Z) = h_0(t) \exp(\beta Z), \quad \forall t \geq 0. \quad (5)$$

式中: $h_0(t)$ 为基准风险函数, 它是全部协变量都为零或标准状态下的风险函数, 一般未知; Z 为影响因素向量, 可能的影响因素包括交通条件属性、驾驶人属性、环境属性、车辆属性; β 为对应影响因素的系

数向量.

分析某 2 个影响因素向量 Z_1, Z_2 的相对风险性时,由式(5)推导出两协变量的相对风险比率 HR 的计算式为

$$HR = h(t/Z_1)/h(t/Z_2) = \exp(\hat{\beta}(Z_1 - Z_2)). \quad (6)$$

式中: $\hat{\beta}$ 为 β 的估计值.

该比值是一个常数,即风险率是成比例的,HR 为 Z_1, Z_2 的函数.若 $HR > 1$,则相较于 Z_2 ,目标换道车辆在 Z_1 的影响下以较短时间来完成换道的概率更大,亦即 Z_2 对目标车辆换道持续时间的影 响大于 Z_1 .

1.2.2 换道持续时间生存函数及累积分布函数

由生存函数 $S(t)$ 和风险函数 $h(t)$ 之间的关系,并结合式(5),可得考虑影响因素下车辆换道持续时间生存函数,即带协变量的累积生存概率

$$S(t) = \{\exp[-H_0(t)]\}^{\exp(\beta Z)} = [S_0(t)]^{\exp(\beta Z)}. \quad (7)$$

式中: $H_0(t)$ 为累计基准的车辆换道持续时间风险函数,见式(8); $S_0(t)$ 为基准的车辆换道持续时间生存函数,表示协变量都被忽略($Z=0$)时的换道持续时间函数,见式(9).

$$H_0(t) = \int_0^t h_0(u) du. \quad (8)$$

$$S_0(t) = \exp[-H_0(t)] = \exp\left[-\int_0^t h_0(u) du\right]. \quad (9)$$

于换道车辆而言,式(7)中的累计生存概率即为给定时间车辆仍没有完成换道的概率.由此可得出,换道持续时间为 t 时,考虑影响因素的车辆换道累积持续时间分布函数(Accumulative Duration of MLC Distribution Function)

$$F(t) = P(X \leq t) = 1 - S(t) = 1 - [S_0(t)]^{\exp(\beta Z)}. \quad (10)$$

1.3 换道持续时间 Cox 比例风险模型半参数估计

换道持续时间 Cox 风险模型中需要估计的有参数 β 和 $h_0(t)$;由 $h_0(t)$ 和 $S_0(t)$ 的关系,可将问题转化为估计 $S_0(t)$.估计的基本思路是先给出 β 的不依赖于 $h_0(t)$ 的偏似然函数,然后极大化偏似然函数,给出 β 的估计,再沿用导出乘积限估计的类似方法估计 $S_0(t)$.

1.3.1 协变量参数 β 的估计 容量为 n 的样本中, m 个目标车辆的换道持续时间是 非删失数据,从小到大排列后依次为 t_1, t_2, \dots, t_m ,即 $t_1 < t_2 < \dots < t_m$,对应的影响因素的协变量矢量依次为 Z_1, Z_2, \dots, Z_m ,另外 $n-m$ 个目标车辆的换道持续时间删失.在

时间 t_i 处的风险集用 $R_i = R(t_i)$ 表示,即所有换道持续时间不短于 t_i 的车辆样本的集合.当多个目标车辆的换道持续时间值相等即数据中存在“结”的情况下,目标车辆换道持续时间的 Cox 风险模型的偏似然函数为

$$L(\beta) = \prod_{i=1}^m \frac{\exp(\beta S_i)}{[\sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta Z_j)]^{d_i}}. \quad (11)$$

式中: d_i 为目标车辆中换道持续时间为 t_i 的个数; S_i 为 d_i 个样本的协变量的和,若 m_i 为 t_i 时刻换道完成的全部目标车辆的集合,则 $S_i = \sum_{j \in m_i} Z_j$.

该函数与 $h_0(t)$ 无关,并能极大化而给出 β 的估计值 $\hat{\beta}$; $L(\beta)$ 是偏似然函数,不能由样本观测值的发生概率推导出来.文献[28]给出了以推断为目的时 $L(\beta)$ 可被当作通常的似然函数处理的合理性.

对式(11)两边取对数,得到对数似然函数 $LL(\beta)$ 为

$$LL(\beta) = \sum_{i=1}^m (\beta S_i) - \sum_{i=1}^m d_i \ln [\sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta Z_j)]. \quad (12)$$

求式(12)的最大值,就能求得偏似然函数的最大似然估计量.再对式(12)求关于 β 的偏导数得

$$\frac{\partial LL(\beta)}{\partial \beta_h} = \sum_{i=1}^m [S_{hi} - d_i \frac{\sum_{j \in R(t_i)} Z_{jh} \exp(\beta Z_j)}{\sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta Z_j)}], \quad h = 1, 2, \dots, q. \quad (13)$$

式中: S_{hi} 为 $S_i = [S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{iq}]$ 中的第 h 个元素.

解 q 个非线性方程组 $\partial LL(\beta) / \partial \beta_h = 0, h = 1, 2, \dots, q$ 可求出 β 的最大似然估计量 $\hat{\beta}$,采用 Newton-Raphson 迭代方法求得数值解.

1.3.2 换道持续时间函数的估计 协变量 Z 下目标车辆换道持续时间函数为

$$S(t) = [S_0(t)]^{\exp(\beta Z)}. \quad (14)$$

只要估计出 $S_0(t)$,即可得到协变量 Z 下目标车辆换道持续时间 $S(t)$ 的估计.得到 β 的估计值后,采用 Kaplan-Meier 乘积限估计方法得出 $S_0(t)$ 的估计为

$$\hat{S}_0(t) = \begin{cases} 1, & t < t_1; \\ \prod_{t \geq t_1} \exp[-d_i \sum_{j \in R(t_i)} \exp(\beta Z_j)], & t \geq t_1. \end{cases} \quad (15)$$

由此可得到任影响因素 Z 下车辆换道持续时间生存函数的估计为(仅考虑 $t \geq t_1$)

$$\hat{S}(t) = [\hat{S}_0(t)]^{\exp(\beta Z)} = [\hat{S}_0(t)]^{\exp(\sum_{k=1}^q \beta_k Z_k)}. \quad (16)$$

2 数据与实证分析

2.1 基础数据和换道持续时间样本提取

交通大数据分析中无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)获取的交通数据较传统监控系统更全面,不仅可以获取平均速度、密度、流率等宏观、中观交通数据,而且可获取道路上包括车辆轨迹、换道和跟车数据在内车辆水平上的微观交通数据^[29]. 于 2016 年 10 月 13 日、14 日 12:00:00-18:00:00, 用大疆 Phantom 4 无人机对包茂高速陕西境内某路段施工作业区进行调研. 对施工作业区进行高空监控摄像,采集了自然驾驶状态下施工作业区的交通量数据及车辆的运动轨迹数据. 分析车型 Z_1 和至合流点距离 Z_2 这 2 个因素对换道持续时间的影响.

样本为所调查的高速公路施工作业区路段的换道车辆,总共收集了 269 个换道车辆的样本. 如表 1 所示中为样本示例,每一行为一个换道车辆样本数据,表示一次换道过程中换道车辆的各项指标,包括样本车辆的编号(ID)、车辆类型(V_T)、目标车辆车速(v)及其开始换道的位置至施工作业区合流点的距离(l),此外还包括了数据是否删失的信息. V_T 为名义变量,分为小型车(0)、中型车(1)和大型车(2); l 为数值型变量,描述车辆换道起点距离合流点的距离;是否删失为分类变量,数据删失编码为 0,数据非删失编码为 1.

表 1 强制换道车辆样本数据示例
Tab. 1 Examples for MLC vehicles samples

ID	X/s	V_T	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	l/m	是否删失
1	6	0	22.5	412	1
2	3	0	36.67	175	1
3	4	1	26.25	96	1
4	4	0	25	105	1
5	4	0	28	55	1
...					

2.2 强制换道持续时间的总体分布及 Cox 模型估计结果

调研中发现,在施工作业区,大型车基本都靠右行驶,极少量大型车有换道行为. 图 1 给出了车型和至合流点距离交互影响下车辆换道持续时间分布. 所有样本的平均换道持续时间是 9.87 s, 标准差为 5.67 s.

分类变量“车型”以第 1 类作为参照水平,得到

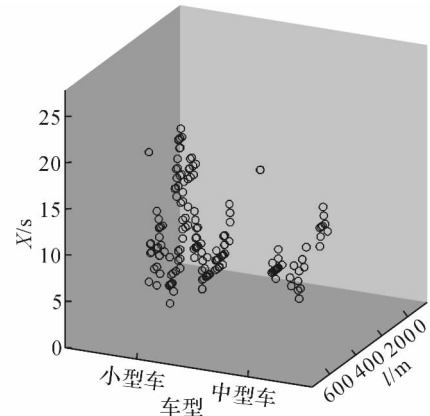


图 1 车型和至合流点距离影响下强制换道持续时间分布
Fig. 1 MLC duration distribution with Interaction between vehicle types and distances to merge point

的参数估计结果如表 2 所示,第 6 列给出了各协变量参数估计的显著水平;可以得出考虑车型和至合流点距离的施工作业区车辆强制换道耗时的 Cox 比例风险模型为

$$h(t/Z)/h_0(t) = \exp(-0.226Z_1 - 0.004Z_2). \quad (17)$$

车型(V_T)系数估计值为-0.226,相对风险为 0.798,表明中型车的强制换道结束的风险略高于小型车,是小型车换道耗时的 0.798 倍. 但该系数的标准误差 SE 相对较大,为 0.157,表明该系数的点估计量不精确而应该计算区间的估计量. 该系数的 95% 置信区间为 $-0.226 \pm 1.96 \times 0.157$, 即 (0.082, 0.534); 对应的相对风险的 95% 置信区间为 (0.586, 1.085). 风险率的置信区间包含 1,说明 V_T 在 Cox 模型中的重要性应该小心地解释,亦即 V_T 对车辆在养护施工作业区换道持续时间的影响并不显著(检验 p 值为 $0.150 > 0.05$). 换道起点至合流点距离(l)系数估计值为-0.004,表明在施工作业区随着车辆至合流点距离的减小,强制换道结束的风险逐渐增加,系数的检验 p 值近似等于 0,说明 l 对车辆在施工作业区换道持续时间有显著影响.

图 2 给出了根据生存分析的半参数方法考虑车型和至合流点距离两协变量计算得到的生存函数曲线. 该图能反映施工作业区车辆换道实施过程中的换道在某时刻完成的概率.

由图形可知随着换道持续时间的增加生存函数的一般变化趋势;强制换道持续过程的生存时间大于 5 s 的概率约为 80%,生存时间大于 10 s 的概率为 28%,一半以上车辆的换道持续过程的生存时间处在 5~10 s 之间,亦即 20% 的施工作业区车辆强

表 2 强制换道持续时间 Cox 模型参数估计结果

Tab. 2 Estimated parameters of the Cox model for mandatory lane changing duration

协变量	β	SE	自由度	显著性 p 值	$\exp(\beta)$	相对风险的 95% 置信区间	
						下部	上部
Z_1	-0.226	0.157	1	0.150	0.798	0.586	1.085
Z_2	-0.004	0.000	1	0.000	0.996	0.995	0.997

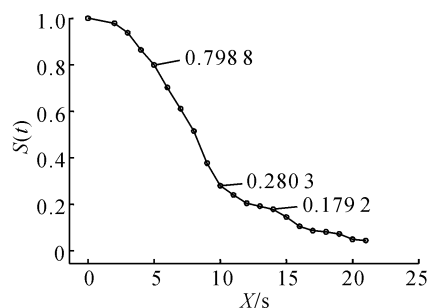


图 2 施工作业区车辆强制换道持续时间的生存函数

Fig. 2 Survival function for MLC duration on Work Zones

制换道持续时间在 5 s 以内,72% 的车辆强制换道持续时间小于 10 s,一半以上(52%)车辆的强制换道持续时间处在 5 ~ 10 s 之间。

如图 3 所示为施工作业区车辆换道持续时间的危险函数,由图 3 可知施工作业区车辆换道持续时间的危险率是个增函数,即某车辆换道持续到的时刻 t 越大,其在时刻完成换道的可能性增加。

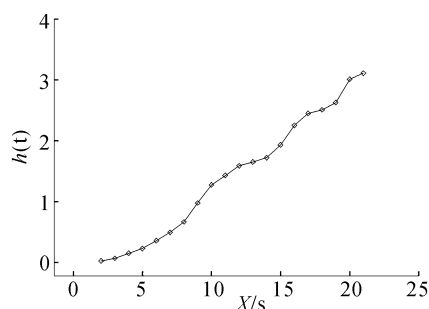


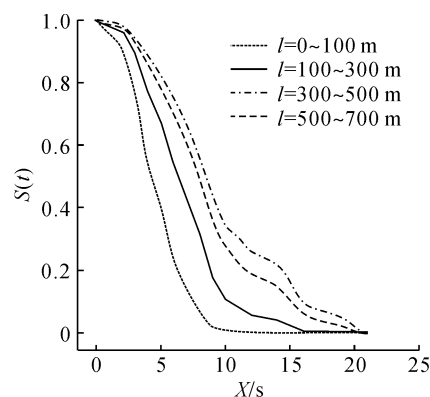
图 3 施工作业区车辆换道持续时间的危险函数

Fig. 3 Hazard Function for MLC duration on Work Zones

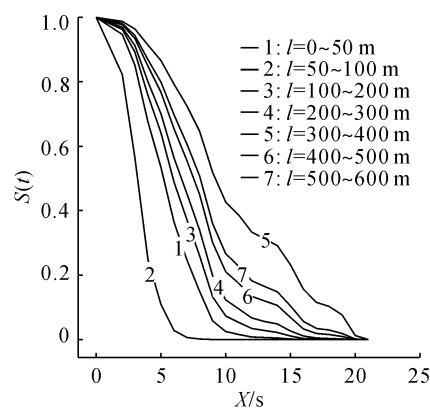
2.3 换道起点对强制换道持续时间的影响

为进一步深入分析换道起点至合流点距离(Dist)对换道持续时间的的影响,将换道起点至合流点距离分别划分为 4 组和 7 组,分别得到不同的换道起点至合流点距离的生存函数和危险函数,如图 4 和 5 所示。

从图 4(a)可知,在相同的生存概率下,至合流点距离 500 m 内,换道起点至合流点距离越近,车辆强制换道持续时间越短;500 m 以外,车辆换道持续时间又开始降低;从图 5(a)的风险函数可知,车辆换道时间持续到 t ,在至合流点 0 ~ 100 m 范围内



(a) 4组至合流点距离的生存函数



(b) 7组至合流点距离的生存函数

图 4 不同换道起点换道持续时间的生存函数

Fig. 4 Survival function for MLC duration at different LC initial points

开始换道的车辆在 $t + \Delta t$ 时刻完成换道的可能性最大。

为了得到分析结果,对车辆换道起点至合流点距离进行分组,得到结果如图 4(b)所示;至合流点距离 400 m 内,随着换道起点至合流点距离越来越远,车辆强制换道持续时间先减少后增加,其中,在至合流点距离为 50 ~ 100 m 范围内,车辆的强制换道持续时间达到最短,在至合流点距离为 300 ~ 400 m 范围内车辆的换道持续时间达到最大;400 m 以外,车辆换道持续时间降低,后又有缓慢增大;从图 5(b)中的风险函数可知,车辆换道时间持续到 t ,在至合流点 50 ~ 100 m 范围内开始换道的车辆在 $t + \Delta t$ 时刻完成换道的可能性最大。

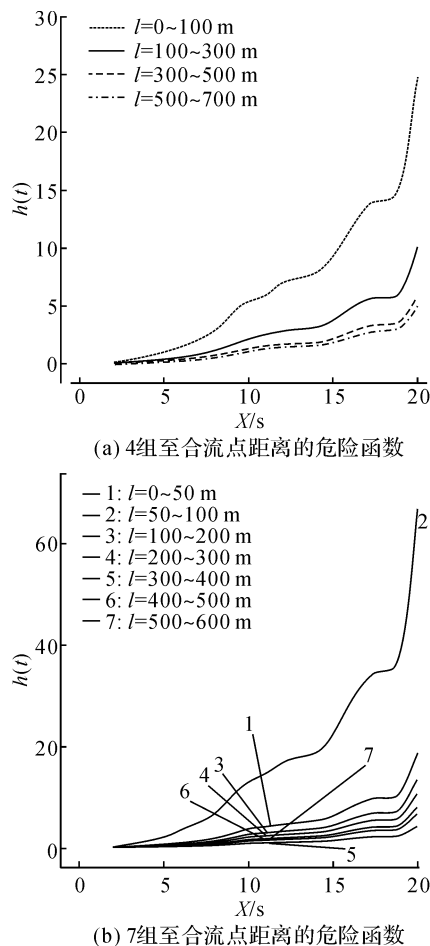


图5 不同换道起点换道持续时间的危险函数

Fig. 5 Hazard function for MLC duration at different LC initial points

3 结 论

采用生存分析非参数方法,构建了施工作业区车辆换道持续时间的风险分析模型,以包茂高速陕西省境内某路段典型施工作业区使用 UAV 采集的车辆换道数据为例,利用样本数据对模型参数进行估计,定量分析了车型和换道车辆的换道起点至合流点距离等因素对车辆换道持续时间的影响.得出的主要结论如下:

(1) 强制换道持续过程的生存时间大于 5 s 的概率约为 80%,大于 10 s 的概率为 28%,一半以上处在 5~10 s 之间.

(2) 在至合流点距离为 50~100 m 的范围内,车辆的强制换道持续时间达到最短;距离为 300~400 m 范围内达到最大.

(3) 至合流点距离 400 m 内,随着换道起点至合流点距离越来越近,车辆强制换道持续时间先减

少后增加;400 m 以外,车辆换道持续时间降低,后又有缓慢增大.车辆换道时间持续到 t 时刻,在至合流点 50~100 m 范围内开始换道的车辆,在 $t + \Delta t$ 时刻完成换道的可能性最大.

研究成果研究可为交通管理与控制和未来智能网联车自主换道研究奠定一定的理论基础.在复杂多变的行车环境中,多个因素动态协同影响车辆换道,本文重点对影响车辆换道行为的车型和换道车辆换道起点至合流点距离 2 个因素进行了分析,未来可针对目标车辆速度、不同交通时段、与目标车道前/后车的车头间距或时距等对车辆强制换道持续时间的的影响进行研究.在实验路段选取方面,在未来的研究中应选择多个路段多个施工作业区进行进一步深入对比研究.

参考文献 (References):

- [1] RAHMAN M, CHOWDHURY M, XIE Y, et al. Review of microscopic lane-changing models and future research opportunities [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(4): 1942-1956.
- [2] LI X G, JIA B, JIANG R. The effect of lane-changing time on the dynamics of traffic flow [C]// *International Conference on Complex Sciences*. Shanghai: Springer Berlin Heidelberg, 2009: 589-598.
- [3] SINGH K, LI B. Discrete choice modelling for traffic densities with lane-change behavior [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2012, 43: 367-374.
- [4] LI H, SHAO C, WU H, et al. A new cellular automaton model with spatiotemporal process of lane changing execution [C]// *International Conference on Cellular Automata*. Krakow: Springer International Publishing, 2014: 605-609.
- [5] 李玉洁,陈玲娟,张光德.基于元胞自动机的施工区道路车辆换道点研究[J]. *武汉科技大学学报*, 2016, 39(3): 231-235.
LI Yu-jie, CHEN Ling-juan, ZHANG Guang-de. Research of vehicle lane changing point on the construction area road based on cellular automata [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2016, 39(3), 231-235.
- [6] 李慧轩.基于驾驶行为动态获取的换道行为微观建模及仿真校验研究[D]. 北京交通大学, 2016.
LI Hui-xuan. Research on microscopic modeling and simulation validation of lane changing behavior based on dynamic acquisition of driving behavior [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, doctoral dissertation, 2016.
- [7] 彭非,王伟.生存分析[M].北京:中国人民大学出版社, 2004: 22.
- [8] JOVANIS P, CHANG H. Disaggregate model of high-

- way accident occurrence using survival theory [J]. **Accident Analysis and Prevention**, 1989, (215): 445-458.
- [9] HOJATI A T, FERREIRA L, Washington S, et al. Hazard based models for freeway traffic incident duration [J]. **Accident Analysis & Prevention**, 2013, 52: 171-181.
- [10] LIN L, WANG Q, SADEK A W. A combined M5P tree and hazard-based duration model for predicting urban freeway traffic accident durations [J]. **Accident Analysis & Prevention**, 2016, 91: 114-126.
- [11] YANG X, ABDEL-ATY M, MEI H, et al. An accelerated failure time model for investigating pedestrian crossing behavior and waiting times at signalized intersections [J]. **Accident Analysis & Prevention**, 2015, 82: 154-162.
- [12] 环梅. 基于生存分析的信号交叉口非机动车穿越行为研究[D]. 北京交通大学, 2014.
HUAN Mei. Crossing behavior of non-motorized vehicles at urban intersections based on survival analysis method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, doctoral dissertation, 2014.
- [13] VLAHOIANNI E I, KEPATSOGLOU K, TSET-SOS V, et al. A real-time parking prediction system for smart cities [J]. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, 2016, (202): 192-204.
- [14] YAMAMOTO T, KITAMURA R. An analysis of house hold vehicle holding durations considering intended holding durations[J]. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2000, (345): 339-351.
- [15] GARIKAPATI V, SIDHARTHAN R, PENDYALA R, et al. Characterizing household vehicle fleet composition and count by type in integrated modeling framework [J]. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2014 (2429):129-137.
- [16] OKUSHIMA M. Multi-agent simulation for promoting clean energy vehicles from the perspective of concern for the environment and local interactions [J]. **Asian Transport Studies**, 2016, (41): 96-113.
- [17] STATHOPOULOS A, KARLAFTIS M G. Modeling duration of urban traffic congestion [J]. **Journal of Transportation Engineering**, 2002, (1286): 587-590.
- [18] 周映雪,杨小宝,环梅. 基于生存分析的城市道路交通拥堵持续时间研究 [J]. **应用数学和力学**, 2013, (341). 98-106
ZHOU Yin-xue, YANG Xiao-bao, HUAN Mei, et al. Survival analysis approach for estimating urban traffic congestion duration [J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 2013, (341): 98-106.
- [19] 杨文臣,张轮,施奕骋,等. 城市快速路交通事件持续时间生存分析 [J]. **交通运输系统工程与信息**, 2014, (145): 168-174.
YANG Wen-chen, ZHANG Lun, SHI Yi-cheng, et al. Survival analysis of traffic incident duration for urban expressways [J]. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 2014, (145), 168-174.
- [20] JI Y B, JIANG R, QU M, et al. Traffic incident clearance time and arrival time prediction based on hazard models [J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2014, (20145): 835-892.
- [21] ZOU Y, HENRICKSON K, LORD D, et al. Application of finite mixture models for analysing freeway incident clearance time [J]. **Transportmetrica A: Transport Science**, 2016, (122): 99-115.
- [22] HOU L, LAO Y, WANG Y, et al. Time-varying effects of influential factors on incident clearance time using a non-proportional hazard-based model [J]. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 2014, 63: 12-24.
- [23] YANG X, GAO Z, GUO H, et al. Survival analysis of car travel time near a bus stop in developing countries [J]. **Science China Technological Sciences**, 2012, (558): 2355-2361.
- [24] 尚山山, 钱大琳. 基于生存分析的小汽车通勤者出发时刻研究 [J]. **武汉理工大学学报:交通科学与工程版**, 2013, (375): 1076-1079.
SHANG Shan-shan, QIAN Da-lin. Car commuters departure time selection analysis based on survival analysis [J]. **Journal of Wuhan University of Technology : Transportation Science & Engineering**, 2013, (375), 1076-1079.
- [25] DIMITRIOU L. Mechanisms of serious accidents risk mapping based on duration modeling of discretized urban continuums[C]// **Hellenic Road Safety Conference**. Athens: [s. n.]2015.
- [26] HAQUE M M, WASHINGTON S. The impact of mobile phone distraction on the braking behaviour of young drivers: a hazard-based duration model [J]. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 2015, 50: 13-27.
- [27] FU C, ZHANG Y, BIE Y, et al. Comparative analysis of driver's brake perception-reaction time at signalized intersections with and without countdown timer using parametric duration models [J]. **Accident Analysis & Prevention**, 2015.
- [28] LAWLESS J F. **Statistical models and Methods for Lifetime Data**[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. , 2002: 348-350.
- [29] WANG L. Design, data collection, and driver behavior simulation for the Open-Mode Integrated Transportation System OMITS) [D]. [S. l.]: Columbia University, 2016.